

УДК: 621.039.7, 547.57

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.001

© 2023. Все права защищены.

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ САМОВОЗГОРАНИЯ АНИОНООБМЕННЫХ СМОЛ В НИТРАТНОЙ ФОРМЕ В ОСУШЕННОМ ВИДЕ

Родин А. В.* (rodin@secnrs.ru),
Шеламов К. В.* (shelamov@secnrs.ru),
Гёзалян Л. В.* (gezalyan@secnrs.ru),
Понизов А. В.* (ponizov@secnrs.ru),
Шарафутдинов Р. Б.* (charafoutdinov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 26 июня 2023 г.

Аннотация

В настоящее время на АЭС накоплено большое количество радиоактивных отходов в виде отработавших ионообменных смол, их захоронение в защитных контейнерах представляет практический интерес, при этом необходимо оценить возможность самовоспламенения смол. С этой целью методом дифференциально-сканирующей калориметрии изучены тепловые эффекты, возникающие при нагреве анионообменных смол АВ-17-8 и Токем-845. Методом газовой хромато-масс-спектрометрии определены газообразные соединения, образующиеся при разложении изученных смол. Определено, что экзотермические эффекты при нагреве смол в хлоридной форме не наблюдаются в отличие от смол в нитратной форме. Для смолы Токем-845, разлагающейся при более низкой температуре, и, следовательно, представляющей большую пожаровзрывоопасность, чем АВ-17-8, оценены кинетические параметры процессов тепловыделения. По этим параметрам проведены расчеты возможности возникновения теплового взрыва в контейнере для захоронения.

► **Ключевые слова:** радиоактивные отходы, анионообменные смолы, тепловые эффекты, самовоспламенение, продукты разложения.

* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

ESTIMATION OF CONDITIONS OF SELF-IGNITION OF DRIED ANION-EXCHANGE RESINS IN NITRATE FORM

Rodin A. V.*, Ph. D.,
Shelamov K. V.*,
Gezalyan L. V.*,
Ponizov A. V.*, Ph. D.,
Sharafutdinov R. B.*, Ph. D.

Article is received on June 26, 2023.

Abstract

Up to date, a large amount of radioactive waste in the form of spent ion-exchange resins has been accumulated at nuclear power plants, and their disposal in protective containers is of practical interest now. However, it is necessary to estimate the possibility of spontaneous combustion of such resins. For this purpose, thermal effects occurring during the heating of AV-17-8 and Tokem-845 anion-exchange resins were studied using the differential scanning calorimetry. The method of gas chromatography-mass-spectrometry was used to determine gaseous compounds formed during the decomposition of the studied resins. It was determined that exothermic effects are not observed when resins in chloride form are heated, unlike the resins in nitrate form. Kinetic parameters of the heat release processes were evaluated for Tokem-845 resin, which decomposes at a lower temperature and therefore presents a greater fire and explosion hazard than AV-17-8 resin. Based on these parameters, calculations were made to determine the possibility of a thermal explosion occurring in the disposal container.

► **Keywords:** *radioactive waste, anion-exchange resins, thermal effects, spontaneous combustion (self-ignition), decomposition products.*

* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

Введение

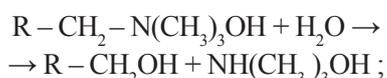
В настоящее время на атомных электростанциях (АЭС) накоплено большое количество радиоактивных отходов в виде отработавших ионообменных смол (ОИОС), которые, в соответствии с требованиями законодательства [1–3], следует переработать и кондиционировать для дальнейшего безопасного хранения и захоронения.

В качестве возможных методов кондиционирования ОИОС рассматриваются следующие [4–7]:

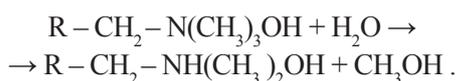
- включение в матрицу: цементирование, остекловывание, битумирование, включение в полимерную композицию;
- регенерация: глубокая дезактивация, сверхзвуковая гидродинамическая обработка;
- термическая обработка: сжигание, пиролиз, пирогидролит;
- сушка: термовакуумная сушка, центрифугирование;
- окислительное разложение в водных средах (в сверхкритических условиях, пероксидом водорода);
- прессование и другие.

Одним из методов, перспективным с точки зрения относительной простоты реализации, является осушка ОИОС с их последующим размещением в защитный контейнер без включения в матрицу [8–10]. При этом практический интерес представляет оценка возможности самовоспламенения осушенных ОИОС при длительном хранении и (или) захоронении в невозвратном защитном контейнере, а также при воздействии внешних факторов, таких как пожар на пункте хранения радиоактивных отходов. Это связано со сложным химическим составом ОИОС в местах их сбора и временного хранения на АЭС из-за возможного наличия нитрат-иона в емкостях и способностью к воспламенению анионообменных смол в нитратной форме [11]. Вопросу исследований термической стабильности ионообменных смол посвящен ряд обзорных работ, среди которых [12, 13], при этом для сильноосновных анионообменных смол считается, что деструкция протекает по следующим двум основным направлениям [13]:

- дезаминирование:



- деградация:



Также отмечается, что солевые формы анионообменных смол более устойчивы к деструкции, чем гидроксильные. Относительная термостойкость нитратной формы зависит от температуры. До 140 °С она более устойчива к нагреванию, а при 160–200 °С происходит ее пиролитическое разложение с самовозгоранием. Температура самовоспламенения понижается с увеличением степени сшивки анионита и концентрации азотной кислоты, использованной для его регенерации [13].

При этом известно [14], что тепловое самовоспламенение зависит от ряда факторов и в целом определяется тепловым равновесием в системе, где энергия выделяется за счет химических превращений и частично или полностью расходуется на нагрев окружающей среды. В [15, 16] было показано, что методами термического анализа возможно определить кинетические параметры разложения ионообменных смол и использовать полученные данные для анализа самовоспламенения исследованных материалов в широком диапазоне условий, то есть осуществить масштабный переход от миллиграммовых навесок образца к существенно большему, представляющим интерес для анализа безопасности.

В рамках настоящей статьи были изучены образцы сильноосновных смол, важных для оценки безопасности обращения с ОИОС, включая АВ-17-8 [17] и его современный аналог Токем-845 [18] в нитратной форме. Оценены кинетические закономерности тепловыделения, и определены образующиеся при термическом распаде газообразные продукты деструкции.

Методическая часть

Исходный анионит в хлоридной форме перевели в нитратную форму путем пропускания через него 30 объемов 5 %-ной азотной кислоты. Избыток азотной кислоты отмывали дистиллированной водой до pH=7 на выходе из колонки и высушивали при комнатной температуре в эксикаторе над пентаоксидом фосфора до постоянной массы.

Для получения исходных калориметрических данных, на основе которых разрабатывалась математическая модель окислительного разложения, использовали метод дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрии, анализ проводили в синхронном термическом анализаторе STA 449 F3 Jupiter® (СТА) [19]. Исследования проводили при двух разных условиях: в атмосфере аргона или воздуха. Поток газа через печь СТА

составлял: для инертной среды – 70 мл Аг/мин, для окислительной среды – 200 мл воздуха/мин и 20 мл Аг/мин. Скорость нагрева, задаваемая на приборе, составляла 1, 2 или 5 К/мин. Нагрев проводился от 50 до 500–600 °С. Образцы помещали в керамические тигли с крышками, имеющими отверстия, масса навески образцов составляла в среднем 15–20 мг. Массу исследуемых образцов определяли на аналитических весах HT 224 CE ViBRA фирмы SHINKO DENSHI [20].

Для анализа газообразных продуктов разложения образцов использовали газовый хромато-масс-спектрометр Agilent 8890 GC – Q1500MS [21], соединенный газотранспортной линией с термическим анализатором. Для разделения компонентов применяли хроматографическую колонку капиллярного типа HP-5 Agilent длиной 30 м в режиме постоянного потока газа-носителя гелия величиной 1,5 мл/мин. В масс-спектрометре ионизация осуществлялась электронным ударом. Диапазон сканирования m/z составлял от 10 до 350, скорость сканирования – 1,3 цикла/с. Отбор газа для анализа проводили через газотранспортную линию в хроматографическую колонку с периодичностью 5 минут при фиксированном значении температуры термостата колонки – 80 °С.

Для первичной обработки данных экспериментов на СТА, оценки параметров кинетических уравнений разложения-окисления анионита в нитратной форме использовали комплекс программ для ЭВМ TSS фирмы ЗАО «Химинформ» [22].

Для расчета тепловых эффектов были получены термограммы образцов оксида алюминия,

которые использовали в качестве экспериментальных базовых линий и вычитали из полученных сигналов для исследуемых образцов. При обработке данных для кинетического анализа проводили процедуры восстановления исходного сигнала и температуры образца [23].

Обработку хроматограмм проводили с использованием специализированной программы для ЭВМ, поставляемой с оборудованием Agilent 8890 GC – Q1500MS, идентификацию газообразных продуктов разложения анионообменных смол выполняли по базе данных NIST [24] версии 2020 г.

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили по формулам 1 и 2:

$$\mu(x) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \text{– среднее значение;} \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad \text{– среднеквадратическая погрешность.} \quad (2)$$

Расчет критических условий самовоспламенения смолы проводили в программном комплексе ThermEx [22] для геометрии защитного невозвратного контейнера, предназначенного для захоронения [25] (рис. 1).

Экспериментальная часть

Результаты термического анализа образцов смол АВ-17-8 и Токем-845 [17, 18] в нитратной форме при скорости нагрева 5 К/мин в среде аргона показывают (рис. 2), что протекает многостадийное экзотермическое превращение в диапазоне температур 200–350 °С. Общий тепловой эффект составляет

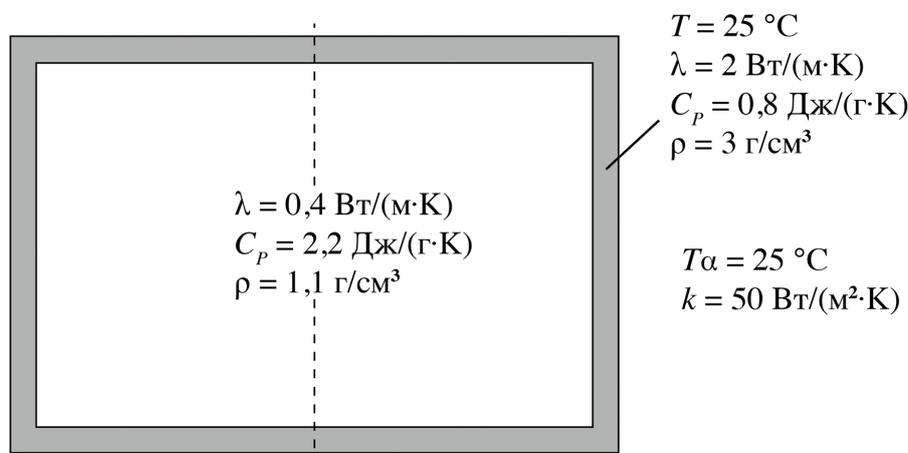


Рис. 1. Геометрия защитного контейнера и начальные условия для проведения расчетов самовоспламенения смолы в нитратной форме. Внешние габариты куба: длина 1,7 м, ширина 1,7 м, высота 1,4 м, толщина стенки 0,15 м
 [Fig. 1. Geometry of a protective container and initial conditions for calculations of the resin in nitrate form self-ignition. Overall dimensions of the container: length 1.7 m, width 1.7 m, height 1.4 m, wall thickness 0.15 m]

627±95 и 423±47 Дж/г для исследованных смол соответственно, что, с учетом международных подходов, позволяет потенциально отнести осушенную смолу к классу саморазлагающихся веществ и смесей (класс 4.1 b), представляющих опасность в отношении возможного развития теплового взрыва [26]. Учитывая теплоемкости органических материалов порядка 2 Дж/г, общий подъем температуры за счет протекания данных экзотермических процессов может составить 200–300 °С.

Следует отметить, что экзотермический процесс в области температур 200–350 °С связан с взаимодействием смолы с нитро-группами, о чем свидетельствует отсутствие экзотермического эффекта для смолы в исходной хлоридной форме, для которой в данном температурном диапазоне наблюдается эндотермический процесс. Термограммы образцов смолы АВ-17-8 в хлоридной и нитратной формах представлены на рис. 3. При этом для хлоридной формы в газообразных продуктах наблюдаются триметиламин и хлорметан, что согласуется с ранее известными данными [13], в отличие от нитро-формы, для которой в данном температурном диапазоне характерно разложение с образованием триметиламина, N-нитрозодиметиламина, N,N-диметилформамида и N-нитродиметиламина, о чем свидетельствуют хроматограммы, представленные на рис. 4 и 5.

Испытания данных образцов в воздушной среде показывают (рис. 6), что в той области, где для аргоновой среды наблюдается потеря массы образца и в которой практически невозможно идентифицировать тепловые эффекты (350 °С и выше), для воздушной среды наблюдается интенсивный экзотермический процесс. Общий тепловой эффект превышает 2 000 Дж/г на массу исходной смолы в нитратной форме.

При этом проведенный анализ газообразных продуктов разложения в данном температурном диапазоне (350–450 °С) указывает на наличие большого числа органических соединений в газовой фазе, к основным из которых следует отнести стирол, толуол, 4-метил-1-этилбензол, 3-метил-1-этилбензол, этилбензол.

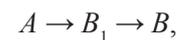
Хроматограмма газообразных продуктов разложения сорбента АВ-17-8 в нитратной форме в аргоновой атмосфере при температуре 410 °С приведена на рис. 7.

Учитывая, что образуется большое количество горючих соединений, можно сделать вывод, что нагрев анионообменных смол в нитратной форме

в воздушной среде может привести к воспламенению в отличие от нагрева в инертной среде. При этом следует отметить, что используемая атмосфера практически не оказывает влияния на низкотемпературные экзотермические процессы (до 350 °С), что указывает на отсутствие взаимодействия образцов с атмосферой в данном температурном диапазоне.

Для определения условий самовоспламенения проведена оценка кинетических параметров, описывающих разложение смолы Токем-845 в нитратной форме в температурном диапазоне 150–300 °С. При этом учитывалось, что протекание экзотермического процесса зависит от скорости нагрева образцов, что можно наблюдать на термограммах (смещение вправо кривых потери массы с увеличением скорости) как для воздушной среды (рис. 8), так и для инертной среды (рис. 9), что указывает на наличие автокаталитической стадии.

В качестве объекта для проведения кинетического анализа и дальнейших расчетов была выбрана смола Токем-845 в нитратной форме, так как для проведенной серии экспериментов именно данная смола разлагается при минимальной температуре, то есть представляет наибольшую опасность развития неуправляемых химических экзотермических процессов. С учетом полученных экспериментальных данных предложена схема разложения, описывающая экзотермические процессы, наблюдаемые в диапазоне температур 200–350 °С:



где каждая стадия представлена уравнением общего автокатализа:

$$r_i = k_0 e^{-ERT} (1 - \alpha_1)^{n_1} (z_0 e^{-Ez/RT} + \alpha_2^{n_2}), \quad (3)$$

где r_i – скорость реакции (тепловыделения), c^{-1} ;

k_0 – предэкспоненциальный множитель, c^{-1} ;

E – энергия активации, кДж/моль;

R – универсальная газовая постоянная,

8,31 Дж/(моль·К);

T – температура, К;

α_i – глубина превращения по данной стадии;

n_i – порядок реакции;

z_0 – константа автокатализа;

E_z – энергия активации реакции автокатализа, кДж/моль.

Параметры, удовлетворительно описывающие экспериментальные данные (рис. 10), приведены в таблице.

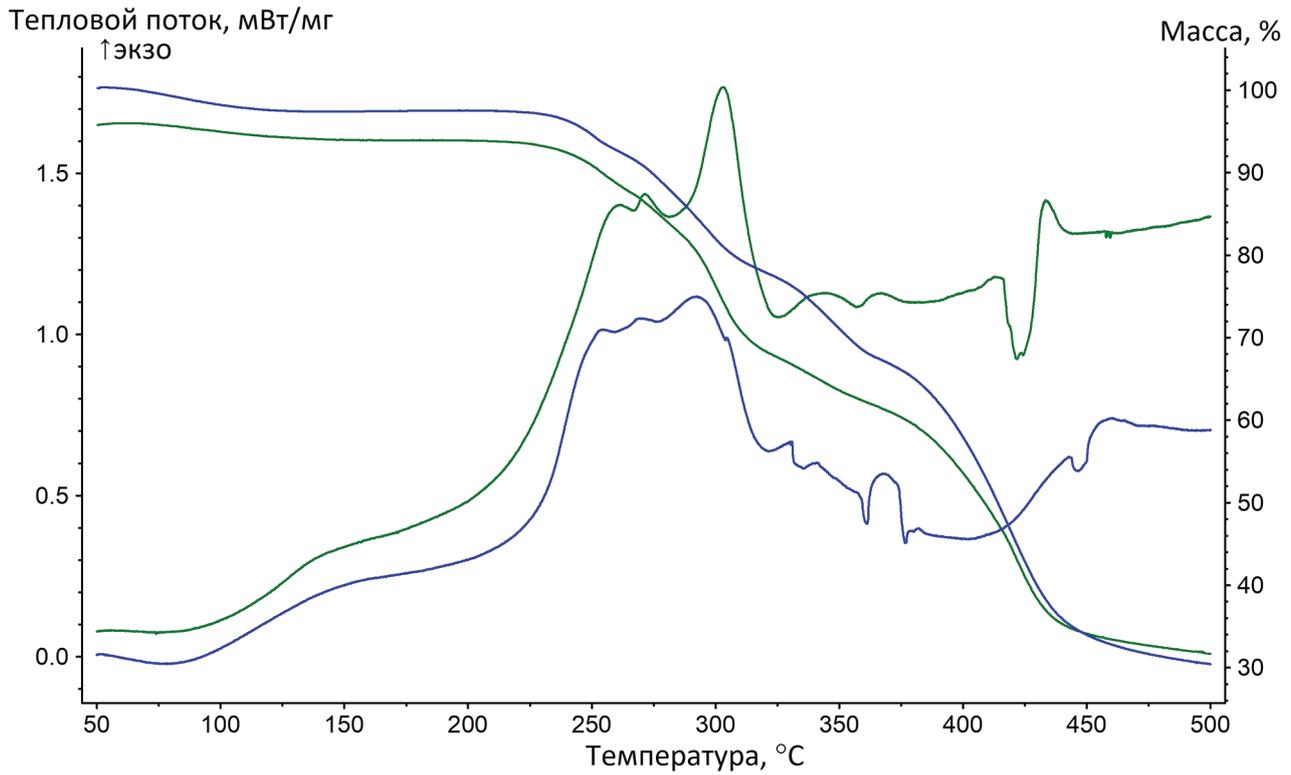


Рис. 2. Термограммы образцов сорбентов АВ-17-8 (зеленый) и Токем-845 (синий) в нитратной форме в аргонной атмосфере при скорости нагрева 5 К/мин
 [Fig. 2. Thermograms for AV-17-8 sorbent (green) and Tokem-845 sorbent (blue) samples in nitrate form in argon atmosphere at the heating rate of 5 K/min]

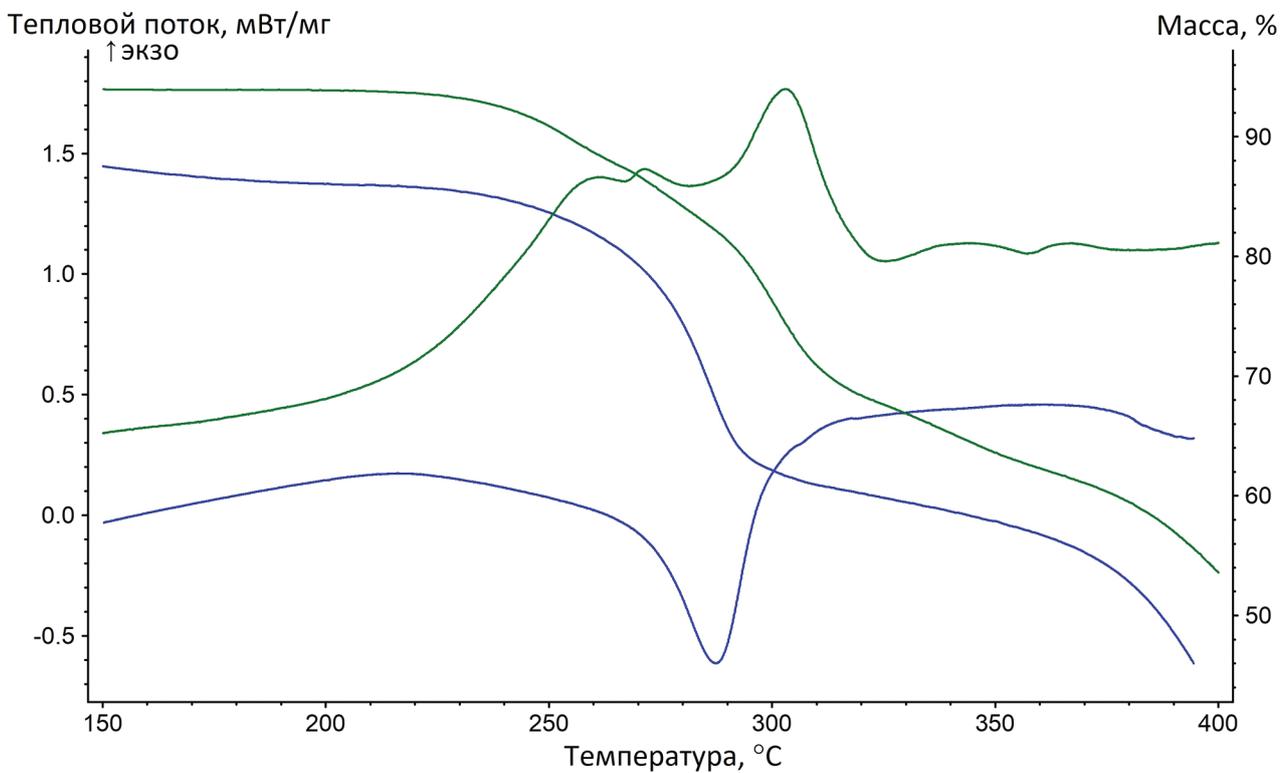


Рис. 3. Термограммы образцов сорбента АВ-17-8 в хлоридной (синий) и нитратной (зеленый) формах в аргонной атмосфере при скорости нагрева 5 К/мин
 [Fig. 3. Thermograms for AV-17-8 sorbent samples in chloride (blue) and nitrate (green) forms in argon atmosphere at the heating rate of 5 K/min]

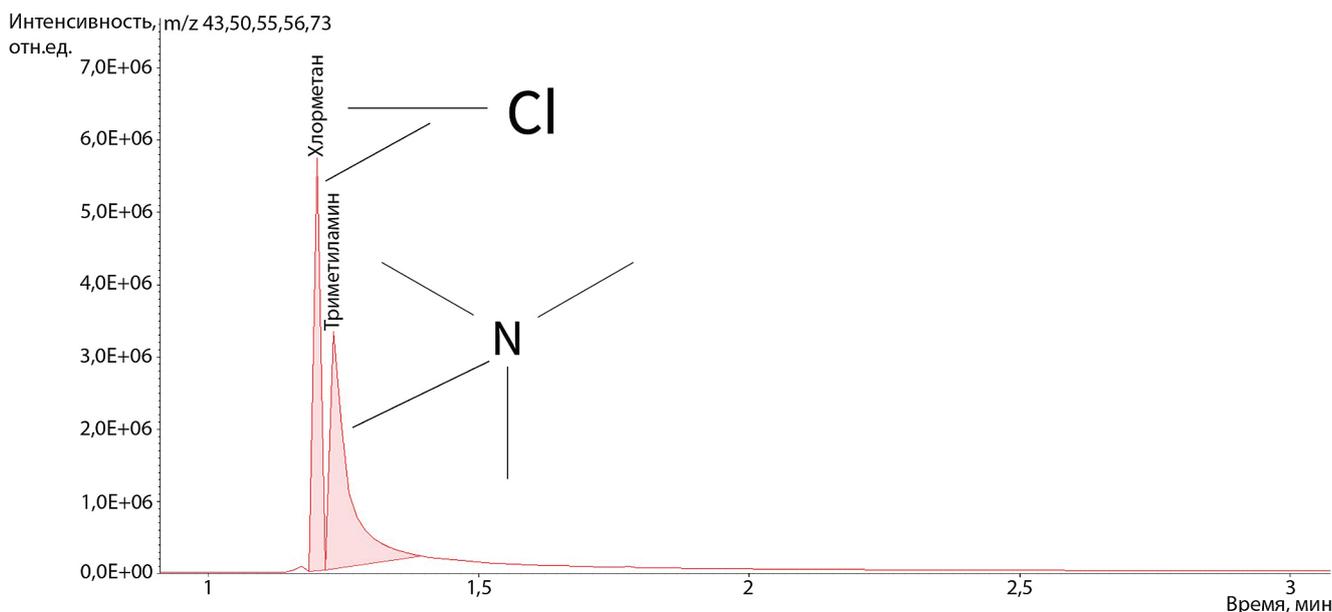


Рис. 4. Хромотограмма газообразных продуктов разложения сорбента АВ-17-8 в хлоридной форме в аргоновой атмосфере при температуре 260 °С
 [Fig. 4. Chromatogram for gaseous products of the decomposition of the AV-17-8 sorbent in chloride form in argon atmosphere at the temperature of 260 °C]

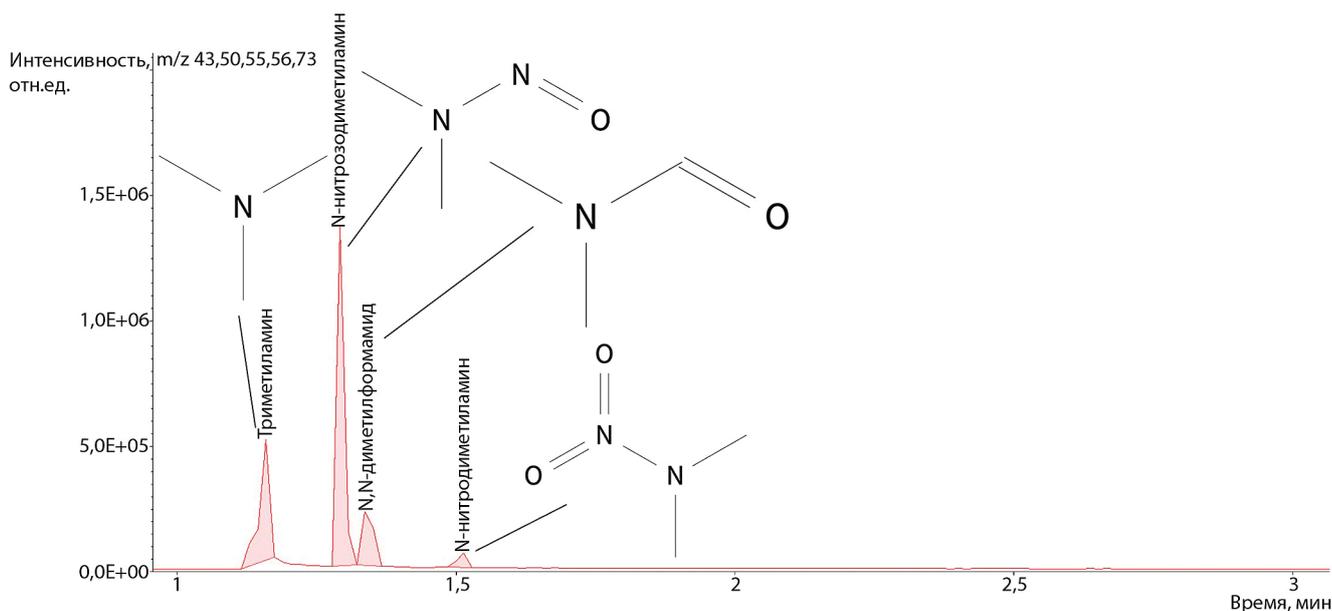


Рис. 5. Хромотограмма газообразных продуктов разложения сорбента АВ-17-8 в нитратной форме в аргоновой атмосфере при температуре 270 °С
 [Fig. 5. Chromatogram for gaseous products of the decomposition of the AV-17-8 sorbent in nitrate form in argon atmosphere at the temperature of 270 °C]

Учитывая приведенные параметры разложения смолы Токем-845 в нитратной форме, были проведены оценочные расчеты возможности возникновения теплового взрыва в контейнере, геометрия которого представлена на рис. 1. Оценивались условия размещения нагретой смолы в контейнере при внешней температуре воздуха за границами контейнера 25 °С.

Результаты расчета максимальной температуры внутри контейнера показывают, что при начальной температуре осушенной смолы Токем-845 в нитратной форме, составляющей более 170 °С (рис. 11), не исключено развитие неуправляемых химических экзотермических реакций. Так как значимых эндотермических процессов, при которых возможно поглощение энергии и сдерживание разогрева

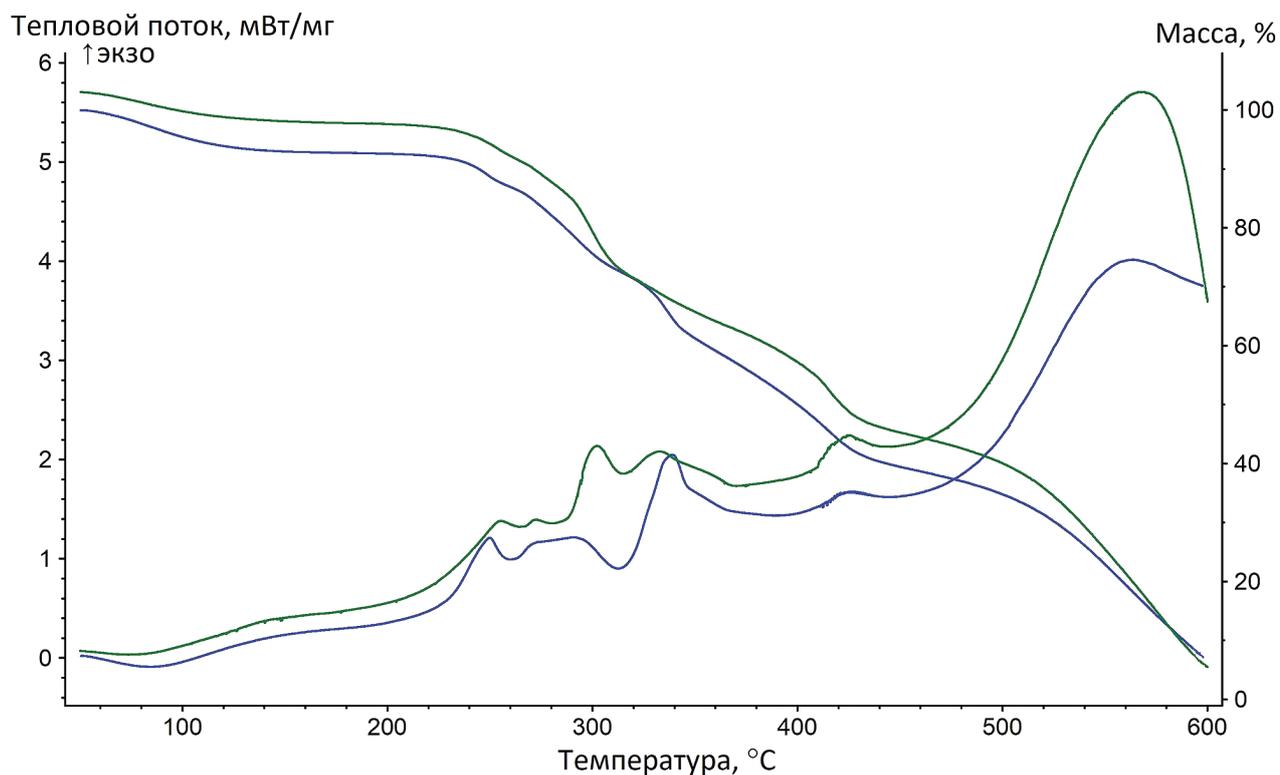


Рис. 6. Термограммы образцов сорбентов АВ-17-8 (зеленый) и Токем-845 (синий) в нитратной форме в воздушной среде при скорости нагрева 5 К/мин
 [Fig. 6. Thermograms for AV-17-8 sorbent (green) and Tokem-845 sorbent (blue) samples in nitrate form in argon atmosphere at the heating rate of 5 K/min]

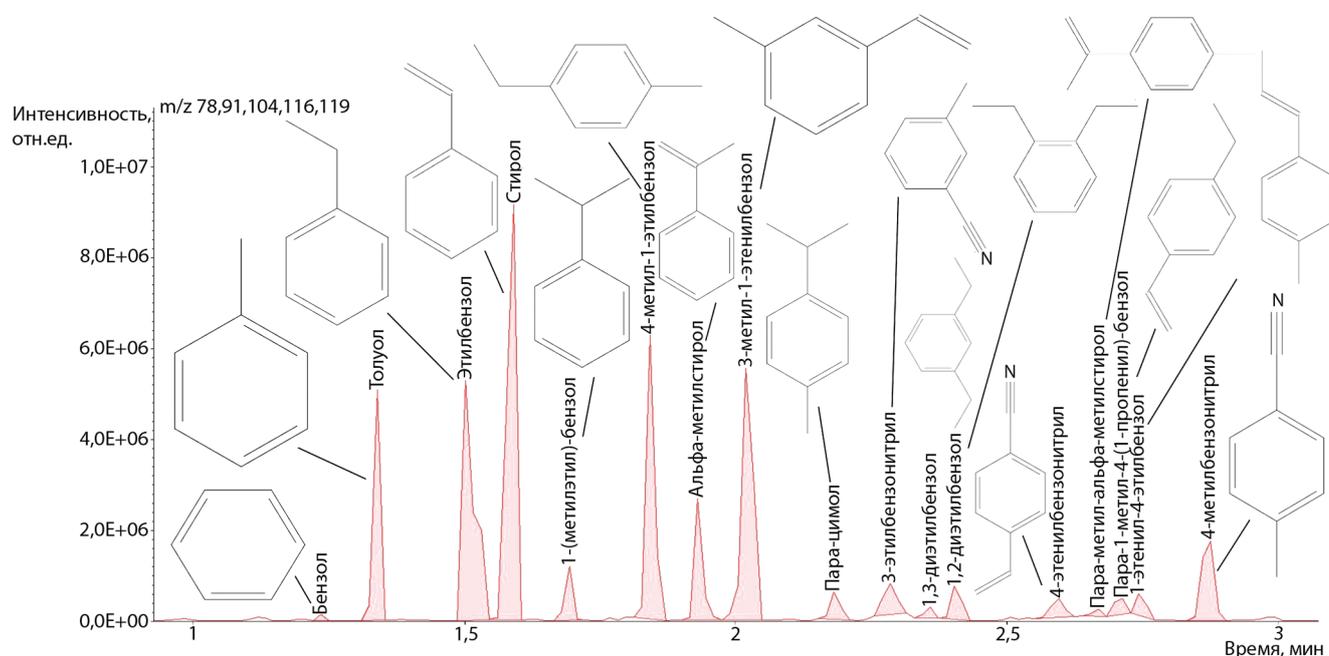


Рис. 7. Хроматограмма газообразных продуктов разложения сорбента АВ-17-8 в нитратной форме в аргоновой атмосфере при температуре 410 °С
 [Fig. 7. Chromatogram for gaseous products of the decomposition of the AV-17-8 sorbent in nitrate form in argon atmosphere at the temperature of 410 °C]

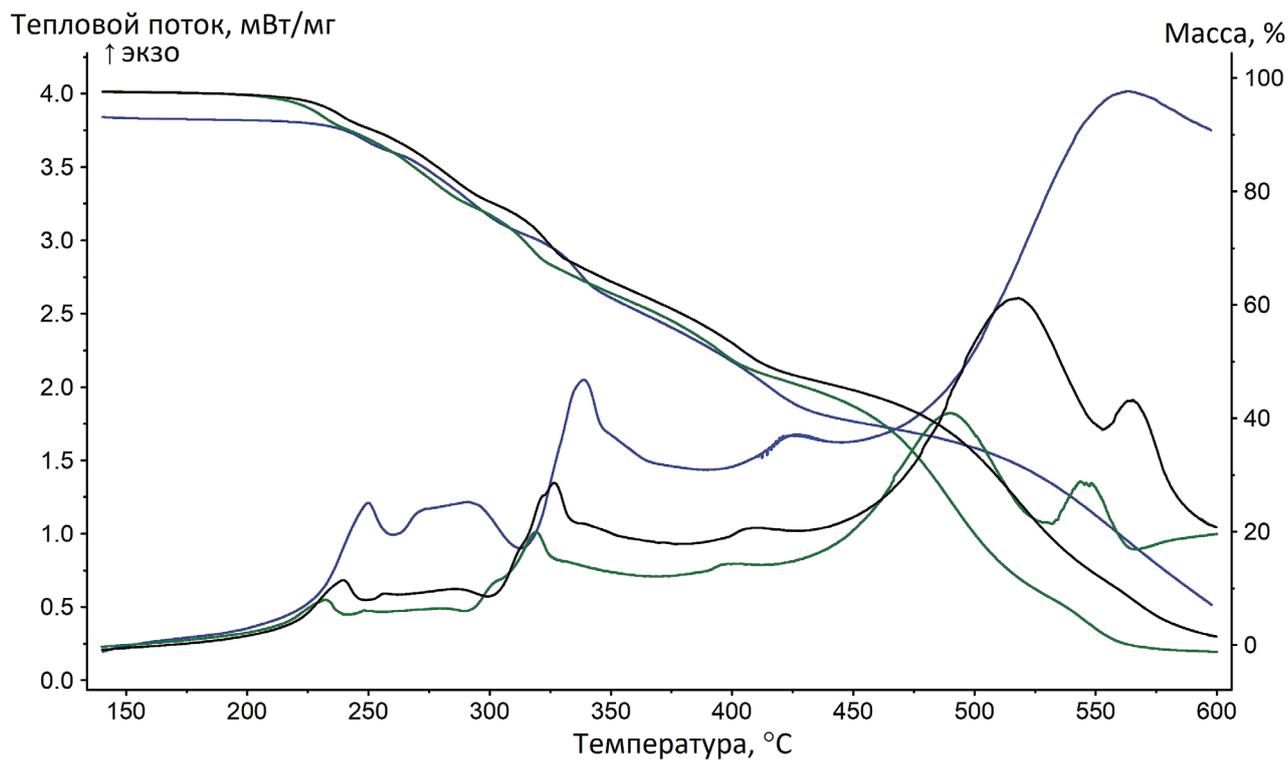


Рис. 8. Термограммы образцов сорбентов Токем-845 в нитратной форме в воздушной среде при скорости нагрева 1 (зеленый), 2 (черный) и 5 (синий) К/мин
 [Fig. 8. Thermograms for Tokem-845 sorbent samples in nitrate form in air atmosphere at heating rates of 1 (green), 2 (black) and 5 (blue) K/min]

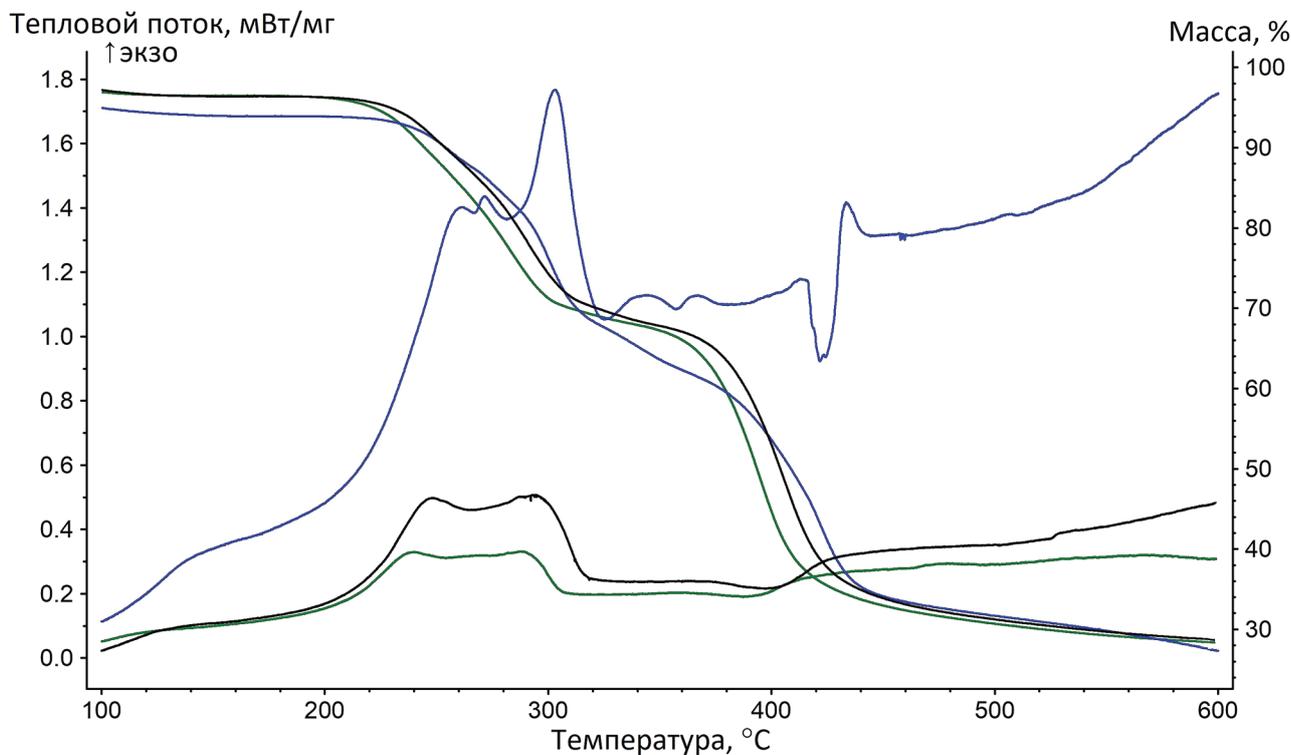


Рис. 9. Термограммы образцов сорбентов АВ-17-8 в нитратной форме в аргонной атмосфере при скорости нагрева 1 (зеленый), 2 (черный) и 5 (синий) К/мин
 [Fig. 9. Thermograms for AV-17-8 sorbent samples in nitrate form in argon atmosphere at heating rates of 1 (green), 2 (black) and 5 (blue) K/min]

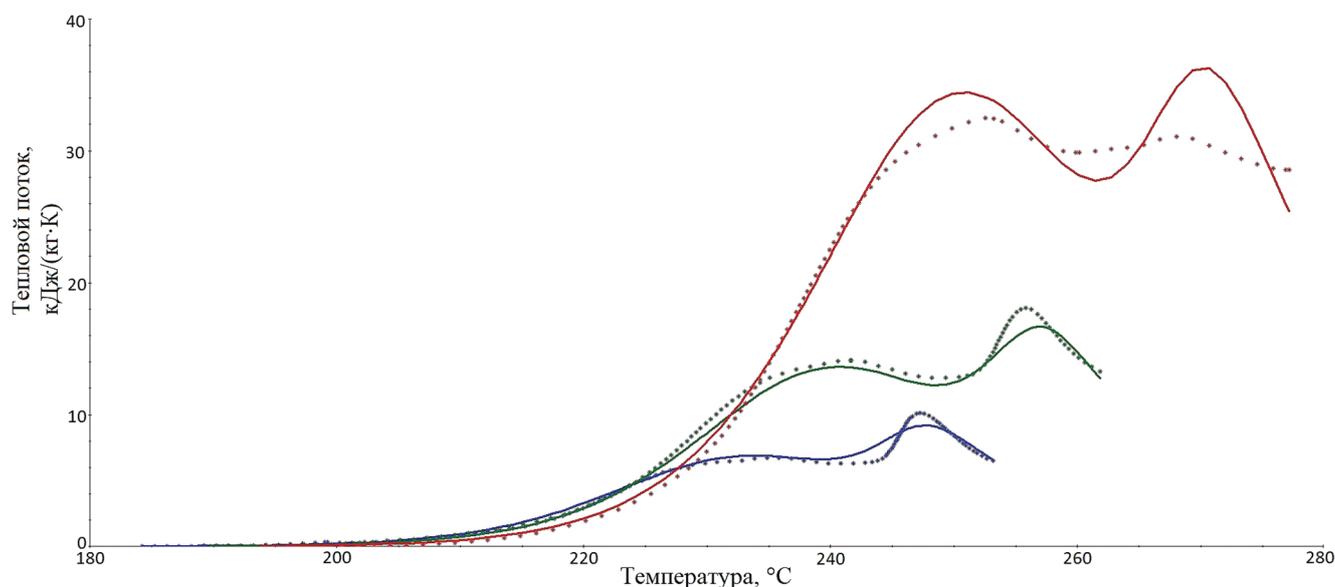


Рис. 10. Экспериментальные данные (точки) разложения смолы Токем-845 в нитратной форме и описание математической моделью (линии) при скорости нагрева 1, 2 и 5 К/мин
 [Fig. 10. Experimental data (points) of the decomposition of the Tokem-845 resin in nitrate form and the fitting by the mathematical model (lines) at heating rates of 1, 2 and 5 K/min]

Таблица

**Параметры кинетического уравнения
 Parameters of the kinetic equation**

Параметр	Единица измерения	Значение для стадии $A \rightarrow B_1$	Значение для стадии $B_1 \rightarrow B$
k_0	с^{-1}	$2,12 \cdot 10^{18}$	$2,65 \cdot 10^{10}$
E	кДж/моль	203,4	122,9
n_1	-	2	3
n_2	-	0,3	0,79
z_0	-	$2,26 \cdot 10^{-6}$	0,11
E_z	кДж/моль	-8,8	8,1
Q	кДж/кг	215	117

системы в данном температурном диапазоне не наблюдается, не исключено повышение температуры на 150–200 °С. При этом наличие или отсутствие кислорода в контейнере на данный процесс не оказывает влияния. Учитывая, что в газообразных продуктах разложения Токем-845 в нитратной форме присутствуют горючие газы, в случае наличия воздуха в контейнере не исключено их дальнейшее окисление с выделением дополнительного тепла и повышением давления в системе.

При температуре смолы менее 160 °С максимальная температура в контейнере снижается без развития неуправляемых химических экзотермичес-

ких процессов. Однако в случае внешнего температурного воздействия на контейнер, которое может возникнуть по причине пожара на объекте, не исключено возгорание содержимого. Расчетное время до воспламенения для осушенной смолы Токем-845 в нитратной форме в зависимости от внешней температуры воздуха в помещении, в котором расположен контейнер, 600, 800 и 1 200 °С, представлено на рис. 12.

Учитывая результаты проведенных расчетов, можно оценить время для принятия мер по ликвидации возгорания, при котором не происходит воспламенение внутреннего содержимого контейнера.

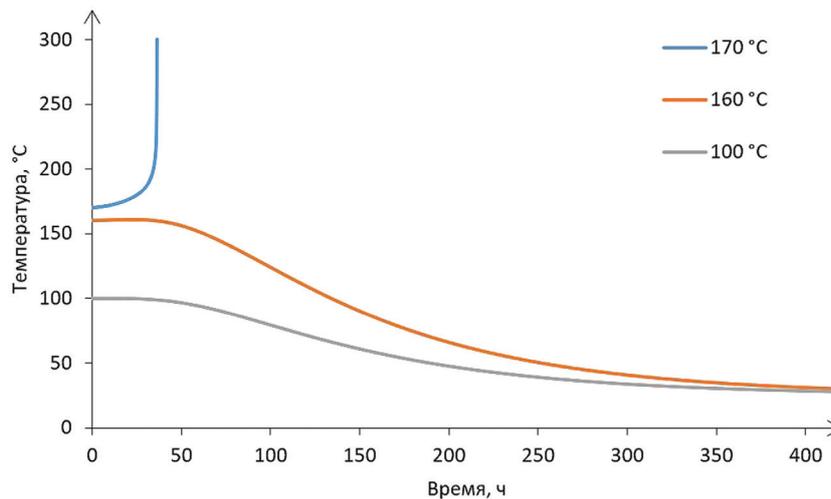


Рис. 11. Расчетное изменение максимальной температуры в контейнере в зависимости от начальной температуры осушенной смолы Токем-845 в нитратной форме [Fig. 11. Calculated evolution of the maximum temperature in the container as a function of the initial temperature of the dried Tokem-845 resin in nitrate form]

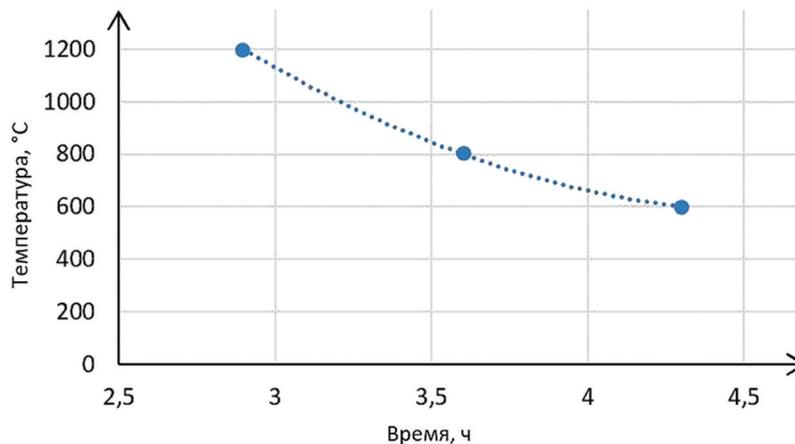


Рис. 12. Расчетное время воспламенения для осушенной смолы Токем-845 в нитратной форме в зависимости от внешней температуры воздуха [Fig. 12. Calculated ignition time for the dried Tokem-845 resin in nitrate form as a function of the external air temperature]

Заключение

Анионообменные смолы в нитратной форме в осушенном виде способны к саморазложению с выделением тепла и газообразных продуктов как в воздушной, так и в инертной среде.

Разложение сильноосновной анионообменной смолы в нитратной форме протекает многостадийно с выделением триметиламина, N-нитрозодиметиламина, N,N-диметилформамида и N-нитродиметиламина в температурном диапазоне 200–350 °C и с преимущественным выделением стирола, толуола, 4-метил-1-этилбензола, 3-метил-1-этилбензола, этилбензола в диапазоне 350–450 °C. Данные продукты являются горючими и могут представлять опасность взрыва в смесях с воздухом.

Самовозгорание сильноосновной анионообменной смолы в нитратной форме может произойти при нарушениях в режиме осушения, связанных с превышением температуры, в том числе при выгрузке перегретой смолы в контейнер. Оценочная предельная температура выгрузки осушенной сильноосновной анионообменной смолы в нитратной форме в контейнер с габаритами 1,7×1,7×1,4 м составляет 160 °C.

В случае пожара в пункте хранения радиоактивных отходов с контейнерами, содержащими осушенную смолу, не исключено возгорание внутреннего содержимого контейнера (осушенной смолы). При этом стенки контейнера выполняют функцию противопожарного барьера. Время до возгорания осушенной смолы зависит от температуры и не превышает 3 ч при внешней температуре 1 200 °C и 4,5 ч для 600 °C.

Литература

1. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения. НП-058-14: утв. постановлением Ростехнадзора от 05.08.2014 № 347.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-019-15: утв. постановлением Ростехнадзора от 25.06.2015 № 242.
4. Treatment and conditioning of spent ion exchange resins from research reactors, precipitation sludges and other radioactive concentrates. Technical manual for the management of low and intermediate level wastes generated at small nuclear research centres, IAEA-TECDOC-689. IAEA, Vienna, 1993.
5. Management of Spent Ion-exchange Resins from Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-238. IAEA, Vienna, 1981.
6. Смольников М. И., Марков В. Ф., Маскаева Л. Н., Бобылев А. Е., Мокроусова О. А. Проблемы утилизации отработанных ионообменных смол атомных электростанций (обзор) // Бутлеровские сообщения: англо-русскоязычный химический журнал. 2017. Т. 49. № 3. С. 119–134.
7. Андреева Е. В., Костов М. А., Наземцева Г. И., Чупрынин С. А. Анализ и обобщение опыта методов переработки отработавших ионообменных смол // Энергетические установки и технологии. 2015. № 1. С. 71–77.
8. Сорокин В. Т., Дёмин А. В., Прохоров Н. А., Великина С. А. Хранение отработавших ионообменных смол низкого и среднего уровня удельной активности в контейнерах типа НЗК без включения в матрицу // Ядерная и радиационная безопасность. 2009. № 4. С. 19–22.
9. Сорокин В. Т., Прохоров Н. А., Павлов Д. И. Технология кондиционирования отработавших ионообменных смол методом термовакуумной сушки // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 39–48. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-39-48.
10. Сорокин В. Т., Прохоров Н. А., Гатауллин Р. М., Бабкин А. Н., Березовский А. В., Павлов Д. И. Исследование осушки и оптимизация кондиционирования отработавших ионообменных смол без включения в матрицу для захоронения // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 25–34.
11. Calmon C. (1980). Explosion hazards of using nitric acid in ion-exchange equipment. Chemical engineering, No. 23, p. 271.
12. Полянский Н. Г., Тулупов П. Е. Термическая устойчивость катионообменных смол // Успехи химии. 1971. Т. 40. № 12. С. 1030–1046. DOI: 10.1070/RC1971v040n12ABEH001990.
13. Полянский Н. Г., Тулупов П. Е. Термическая устойчивость анионообменных смол // Успехи химии. 1971. Т. 42. № 9. С. 754–771. DOI: 10.1070/RC1973v042n09ABEH002730.
14. Бенин А. И., Коссой А. А. Термические опасности и термическая безопасность энергонасыщенных веществ, химических процессов и объектов их применения. – М., Вологда: «Инфра-Инженерия», 2021. 728 с.
15. Калистратова В. В., Родин А. В., Емельянов А. С., Виданов В. Л., Милютин В. В., Белова Е. В. и др. Кинетика термического разложения анионита ВП-1АП в нитратной форме // Радиохимия. 2018. Т. 60. № 3. С. 250–255.
16. Sato Y., Matsunaga T., Koyama Sh., Suzuki T., Ozawa M. (2015). Kinetic analysis and prediction of thermal decomposition behavior of tertiary pyridine resin in the nitrate form. Energy Procedia, No. 71, p. 112–122.
17. Межгосударственный стандарт ГОСТ 20301-2022. Смолы ионообменные. Аниониты. Технические условия. – М.: Российский институт стандартизации, 2022.
18. ТУ 2227-042-72285630-2015. Анионит Токем-845. Сильноосновный гелевый анионит с однородным гранулометрическим составом в рабочей форме. – Кемерово, ООО Производственное объединение «ТОКЕМ», 2015.
19. Прибор синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter®. Паспорт прибора. 2022.
20. Аналитические весы с датчиком Tuning-Fork HT 224 CE ViBRA SHINKO DENSHI. Паспорт прибора. 2022.
21. Система газовой хроматографии. Agilent 8890 GC – Q1500MS. Паспорт прибора. 2022.

22. Thermal Safety Series (TSS). URL: www.cisp.spb.ru/tss (дата обращения: 18.08.2023).
23. Бенин А. И., Белохвостов В. М., Коссой А. А. Восстановление данных при изучении кинетики химических реакций методом ДСК // Журнал физической химии. 1987. Т. LXI. Вып. 5. С. 1205–1210.
24. Химическая база данных Национального института стандартов и технологий США. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry> (дата обращения: 18.08.2023).
25. ГОСТ Р 51824-2001. Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона. Общие технические требования. – М.: Госстандарт России, 2001.
26. Recommendations on the transport of dangerous goods. Model regulations. Vol. 1. 19th revised edition. United Nations, 2015. 856 p.

References

1. Federal'nyi zakon No. 190-FZ "Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vnesenii izmenenii v otдельnye zakonodatelnye akty Rossiiskoi Federatsii" [Federal law No. 190-FZ "On radioactive waste management and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation"]. 2011.
2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoi energii "Bezopasnost' pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami. Obshchie polozheniya" (NP-058-14) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Safety in the handling of radioactive waste. General provisions" (NP-058-14)]. 2014.
3. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniia atomnoi energii "Sbor, pererabotka, khranenie i konditsionirovanie zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniia bezopasnosti" (NP-019-15) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Collection, processing, storage and conditioning of liquid radioactive waste. Security requirements" (NP-019-15)]. 2015.
4. Treatment and conditioning of spent ion exchange resins from research reactors, precipitation sludges and other radioactive concentrates. Technical manual for the management of low and intermediate level wastes generated at small nuclear research centres, IAEA-TECDOC-689. IAEA, Vienna, 1993.
5. Management of Spent Ion-exchange Resins from Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-238. IAEA, Vienna, 1981.
6. Smol'nikov M. I., Markov V. F., Maskaeva L. N., Bobylev A. E., Mokrousova O. A. (2017). Problemy utilizatsii otrabotannykh ionoobmennyykh smol atomnykh elektrostancyi (obzor) [Problems of utilization of spent ion exchange resins of nuclear power plants (review)]. Butlerovskie soobshcheniya: anglo-russkoiazychnyi khimicheskii zhurnal – Butlerov Communications: English-Russian Chemical Journal, Vol. 49, No. 3, pp. 119–134. [in Russian].
7. Andreeva E. V., Kostov M. A., Nazemtseva G. I., Chuprynin S. A. (2015). Analiz i obobshchenie opyta metodov pererabotki otrabotavshikh ionoobmennyykh smol [Analysis and generalization of the experience of methods of processing spent ion exchange resins]. Energeticheskie ustanovki i tekhnologii – Power plants and technologies, No. 1, pp. 71–77. [in Russian].
8. Sorokin V. T., Demin A. V., Prokhorov N. A., Velikina S. A. (2009). Khranenie otrabotavshikh ionoobmennyykh smol nizkogo i srednego urovnya udel'noi aktivnosti v konteynerakh tipa NZK bez vklucheniya v matritsu [Storage of spent ion exchange resins of low and medium specific activity levels in containers of the NRPC type without inclusion in the matrix]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 4, pp. 19–22. [in Russian].
9. Sorokin V. T., Prokhorov N. A., Pavlov D. I. (2021). Tekhnologiya konditsionirovaniya otrabotavshikh ionoobmennyykh smol metodom termovakuumnoi sushki [Technology of conditioning of spent ion exchange resins by thermal vacuum drying]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 2 (15), pp. 39–48. [in Russian].
10. Sorokin V. T., Prokhorov N. A., Gataullin R. M., Babkin A. N., Berezovskii A. V., Pavlov D. I. (2022). Issledovanie osushki i optimizatsiya konditsionirovaniya otrabotavshikh ionoobmennyykh smol bez vklucheniya v matritsu dlia zakhoroneniya [Investigation of drying and optimization of conditioning of spent ion exchange resins without inclusion in the matrix for disposal]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive waste, No. 2 (19), pp. 25–34. [in Russian].
11. Calmon C. (1980). Explosion hazards of using nitric acid in ion-exchange equipment. Chemical engineering, No. 23, p. 271.

12. Polianskii N. G., Tulupov P. E. (1971). Termicheskaya ustoichivost' kationoobmennyykh smol [Thermal stability of cation-exchange resins]. Uspekhi khimii – Advances in chemistry, vol. 40, No. 12, pp. 1030–1046. DOI: 10.1070/RC1971v040n12ABEH001990. [in Russian].
13. Polianskii N. G., Tulupov P. E. (1971). Termicheskaya ustoichivost' anionoobmennyykh smol [Thermal stability of anion-exchange resins]. Uspekhi khimii – Advances in chemistry, vol. 42, No. 9, pp. 754–771. DOI: 10.1070/RC1973v042n09ABEH002730. [in Russian].
14. Benin A. I., Kossoi A. A. (2021). Termicheskie opasnosti i termicheskaya bezopasnost' energonasyshchennykh veshchestv, khimicheskikh protsessov i ob'ektov ikh primeneniya [Thermal hazards and thermal safety of energy-saturated substances, chemical processes and objects of their application]. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya, 728 p. [in Russian].
15. Kalistratova V. V., Rodin A. V., Emelianov A. S., Vidanov V. L., Miliutin V. V., Belova E. V., et al. (2018). Kinetika termicheskogo razlozheniya anionita VP-1AP v nitratnoi forme [Kinetics of thermal decomposition of VP-1AP anionite in nitrate form]. Radiokhimiya – Radiochemistry, vol. 60, No. 3, pp. 250–255. [in Russian].
16. Sato Y., Matsunaga T., Koyama Sh., Suzuki T., Ozawa M. (2015). Kinetic analysis and prediction of thermal decomposition behavior of tertiary pyridine resin in the nitrate form. Energy Procedia, No. 71, pp. 112–122.
17. Mezhsudarstvennyi standart GOST 20301-2022. Smoly ionoobmennyye. Anionity. Tekhnicheskie usloviya [Interstate standard GOST 20301-2022. Ion-exchange resins. Anionites. Specifications]. 2022.
18. TU 2227-042-72285630-2015. Anionit Tokem-845. Silnoosnovnyi gelevyi anionit s odnorodnym granulometricheskim sostavom v rabochei forme [TU 2227-042-72285630-2015. Anionite Tokem-845. Strongly basic gel anionite with the homogeneous granulometric composition in the working form]. 2015.
19. Pasport pribora. Pribor sinkhronnogo termicheskogo analiza STA 449 F3 Jupiter [Passport of the device. Synchronous thermal analysis device STA 449 F3 Jupiter]. 2022.
20. Pasport pribora. Vesy s datchikom Tuning-Fork HT 224 CE ViBRA SHINKO DENSHI [Passport of the device. Scales with sensor Tuning-Fork HT 224 CE ViBRA SHINKO DENSHI]. 2022.
21. Pasport pribora. Sistema gazovoi khromatografii. Agilent 8890 GC – Q1500MS [Passport of the device. Gas chromatography system. Agilent 8890 GC – Q1500MS]. 2022.
22. Thermal Safety Series (TSS). URL: www.cisp.spb.ru/tss (reference date: 18.08.2023).
23. Benin A. I., Belokhvostov V. M., Kossoi A. A. (1987). Vosstanovlenie dannykh pri izuchenii kinetiki khimicheskikh reaktsii metodom DSK [Data recovery in the study of the kinetics of chemical reactions by the DSC method]. Zhurnal fizicheskoi khimii – Journal of physical chemistry, vol. LXI, No. 5, pp. 1205–1210. [in Russian].
24. Chemical database of the US National Institute of Standards and Technology. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry> (reference date: 18.08.2023).
25. GOST R 51824-2001. Konteynery zashchitnye nevozvratnye dlya radioaktivnykh otkhodov iz konstruktsionnykh materialov na osnove betona. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST R 51824-2001. Non-retrievable shielding casks for radioactive waste made of concrete based structural materials. General technical requirements]. 2021.
26. Recommendations on the transport of dangerous goods. Model regulations. Vol. 1. 19th revised edition. United Nations, 2015. 856 p.

Сведения об авторах

Родин Алексей Владимирович, начальник лаборатории аварийных режимов предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Шеламов Кирилл Владимирович, инженер отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Гёзаян Лика Вадимовна, младший научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Шарафутдинов Рашет Борисович, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Authors credentials

Rodin Alexey Vladimirovich, Head of Laboratory of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: rodin@secnrs.ru.

Shelamov Kirill Vladimirovich, Engineer of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: shelamov@secnrs.ru.

Gezalian Lika Vadimovna, Junior Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: gezalyan@secnrs.ru.

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Sharafutdinov Rashet Borisovich, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

Для цитирования

Родин А. В., Шеламов К. В., Гёзалиян Л. В., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б. Оценка условий самовозгорания анионообменных смол в нитратной форме в осушенном виде // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 3 (109). С. 5–19. DOI: 10.26277/ SECNRS.2023.109.3.001.

For citation

Rodin A. V., Shelamov K. V., Gezalyan L. V., Ponizov A. V., Sharafutdinov R. B. Estimation of conditions of self-ignition of dried anion-exchange resins in nitrate form. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2023, No. 3 (109), pp. 5–19. [in Russian]. DOI: 10.26277/ SECNRS.2023.109.3.001.

